

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Absolvování individuální odborné praxe
Individual Professional Practice in the Company

2016

Vojtěch Vachutka

Zadání bakalářské práce

Student: **Vojtěch Vachutka**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: Absolvování individuální odborné praxe
Individual Professional Practice in the Company
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Student vykoná individuální praxi ve firmě: Hansen electric spol. s r.o.
2. Struktura závěrečné zprávy:
 - a. Popis odborného zaměření firmy, u které student vykonal odbornou praxi a popis pracovního zařazení studenta
 - b. Seznam úkolů zadaných studentovi v průběhu odborné praxe s vyjádřením jejich časové náročnosti
 - c. Zvolený postup řešení zadaných úkolů
 - d. Teoretické a praktické znalosti a dovednosti získané v průběhu studia uplatněné studentem v průběhu odborné praxe
 - e. Znalosti či dovednosti scházející studentovi v průběhu odborné praxe
 - f. Dosažené výsledky v průběhu odborné praxe a její celkové zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:


Podle pokynů konzultanta, který vedl odbornou praxi studenta.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 29. dubna 2016



.....
podpis studenta

Poděkování


Rád bych poděkoval mým konzultantům, jmenovitě Mariánu Uhrovi a Pavlu Dudovi, za ochotný přístup při konzultacích a měřeních během vykonávání praxe ve společnosti Hansen electric s.r.o.¹ Oba dva mi aktivně pomáhali při tvorbě bakalářské práce jednak s obsahem, jednak s dodáním materiálů. Komunikace s nimi byla výborná, což dopomohlo k mému rychlému porozumění úkolů. Dále bych chtěl poděkovat panu Josefu Šimečkovi a Pavlu Hawrankovi za možnost tvorby bakalářské práce ve výše zmíněné společnosti. Velký dík patří také mému vedoucímu práce Zdeňku Medvedcovi, který se mnou konzultoval veškeré nesrovnalosti a nejasnosti.

¹ Dále jen HE

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské/diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne: 26. dubna 2016


.....
podpis zástupce

Abstrakt

Tato praktická bakalářská práce se zabývá popisem činnosti, kterou jsem prováděl v zimním a letním semestru akademického roku 2015/2016 na zkušebně ve společnosti Hansen electric, která se věnuje opravě, výrobě a prodeji elektrických motorů a generátorů. Odborná praxe, kterou jsem vykonával, se týkala zejména diagnostických zkoušek elektrických strojů jak na zkušebně, tak na výjezdech mimo společnost. Byl jsem rovněž přítomen u montáží a oprav těchto motorů. Cílem je tedy popsat diagnostické metody a elektrické zkoušky, které jsem aplikoval za odborného dozoru konzultantů. Konkrétně se budu zabývat zkouškami, jako jsou měření izolačního stavu, měření odporů vinutí, měření stavu čidel, zkouška pomocí rázového generátoru, měření teploty termovizní kamerou a měření vibrací. Mým úkolem bude propojit získané teoretické znalosti z vysoké školy s praktickými ve společnosti HE.

Klíčová slova

Vizuální kontrola, porucha, polarizační index, izolační stav, odpor vinutí, zapojení, zkouška rázovým generátorem, termovizní kamera, tepelné senzory.

Abstract

Professional practice in the company describes my work, which I did during winter and summer semestr 2015/2016 in testing room. Company Hansen electric repairs, products and sells electromotors and generators. Profesional practice, which I did, was especially directed on diagnostics at testing room and also outside in the mines. I did mounting and repair of motors too. My primary aim is describing of diagnostics, which I applied together with my mentors. Concretely I am going to write about winding insulation conditions measurement, winding resistance measurement, winding test by impulse generator, sensors resistance measurement, vibration and thermovision measurement. My primary aim will be conecting theoretical knowledge from the university with practical skills from company HE.

Key words

Visual check, failure, polarization index, winding insulation conditions, winding resistence, connection, winding test by impulse generator, thermovision, temperature sensors.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Popis zázemí a spolupráce studenta	- 2 -
1.1 Zaměření společnosti	- 2 -
1.2 Popis pracovního zařazení studenta	- 2 -
2 Seznam úkolů zadaných studentovi	- 3 -
3 Zvolený postup řešení zadaných úkolů	- 4 -
3.1 Smyslová posouzení.....	- 4 -
3.1.1 Využití ostatních smyslů	- 11 -
3.2 Měření izolačního stavu	- 12 -
3.2.1 Fyzikální podstata a základní principy měření	- 12 -
3.2.2 Zdánlivý izolační odpor.....	- 13 -
3.2.3 Polarizační indexy	- 13 -
3.2.4 Test vybíjení dielektrika	- 14 -
3.2.5 Měření izolačního odporu vinutí statoru	- 15 -
3.3 Měření odporů vinutí	- 19 -
3.4 Impulsní srovnávací zkouška	- 21 -
3.4.1 Příklady měření	- 22 -
3.5 Měření teploty	- 24 -
3.5.1 Bezdotykové měření.....	- 24 -
3.5.2 Měření teploty strojů pomocí termovizní kamery	- 25 -
3.5.3 Příklady měření teplot	- 26 -
3.5.4 Tepelné senzory.....	- 28 -
3.6 Vibrodiagnostika.....	- 30 -
3.6.1 Měření a vyhodnocení vibrací	- 30 -
3.6.2 Příklad měření vibrací	- 32 -
4 Znalosti a dovednosti získané v průběhu studia uplatněné studentem v průběhu praxe ..	- 33 -
5 Znalosti či dovednosti scházející studentovi v průběhu odborné praxe	- 34 -
6 Dosažené výsledky v průběhu odborné praxe a její celkové zhodnocení	- 35 -
Citovaná literatura	- 36 -

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
C	F	Kapacita
DAR	(-)	Dielektrický absorpční poměr
DD	(-)	Test vybíjení dielektrika
f	Hz	Frekvence
I	A	Proud
l	m	Délka
Pi	(-)	Polarizační index
R	Ω	Odpor
ρ	Ωm	Rezistivita
S	m^2	Povrch
t	s	Čas
U	V	Napětí

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
DAR	Dielectric absorption ration
IP	Ingress protection
IM	International Mounting
ICP	Inductively coupled plasma
NTC	Negative Temperature Coefficient
PI	Polarizační index
PTC	Positive Temperature Coefficient
RMS	Root Mean Square

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
Obr. 3.1	Zuhelnatělá izolace	- 4 -
Obr. 3.2	Místo mezizávitového zkratu	- 5 -
Obr. 3.3	Přetavení závitů	- 5 -
Obr. 3.4	Mazivo uvnitř stroje	- 6 -
Obr. 3.5	Motor přeplněný mazivem	- 6 -
Obr. 3.6	Zaprášené statorové vinutí	- 7 -
Obr. 3.7	Motor s poškozeným pláštěm	- 7 -
Obr. 3.8	Ulomené části statorových plechů	- 8 -
Obr. 3.9	Mechanické poškození statorových plechů	- 8 -
Obr. 3.10	Přerušení rotorových tyčí	- 9 -
Obr. 3.11	Ukroucená hřídel	- 9 -
Obr. 3.12	Poškození hřídele odebráním spojky	- 10 -
Obr. 3.13	Zadřené ložisko	- 10 -
Obr. 3.14	Motor s ulomenou průchodkou a ventilátorem	- 11 -
Obr. 3.15	Poškozená svorkovnice	- 11 -
Obr. 3.16	Rozložení proudů na začátku měření	- 12 -
Obr. 3.17	Poměrové rozložení celkového proudu	- 13 -
Obr. 3.18	Závislost izolačního odporu na napětí	- 15 -
Obr. 3.19	Zapojení při měření izolačního stavu každé fáze zvlášť	- 16 -
Obr. 3.20	Zapojení při měření izolačního stavu všech fází	- 16 -
Obr. 3.21	Graf závislosti odporu na čase	- 17 -
Obr. 3.22	Zapojení při měření odporu mezi fázemi	- 19 -
Obr. 3.23	Zapojení při měření odporu proti uzlu	- 20 -
Obr. 3.24	Zapojení při měření odporu každé fáze zvlášť	- 20 -
Obr. 3.25	Schéma rázového generátoru	- 21 -
Obr. 3.26	Odezvy na napět'ové namáhání motoru bez poruchy	- 22 -
Obr. 3.27	Odezvy na napět'ové namáhání fází U - V	- 22 -
Obr. 3.28	Odezvy fází V - W	- 23 -
Obr. 3.29	Odezvy fází U - W	- 23 -
Obr. 3.30	Porucha chlazení motoru	- 26 -
Obr. 3.31	Porucha vinutí v podobě závitového zkratu	- 27 -
Obr. 3.32	Měření teploty štítů	- 27 -
Obr. 3.33	Srovnání linearity kovových a polovodičových senzorů	- 29 -
Obr. 3.34	Měřicí body elektromotoru	- 32 -

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
Tab. 3.1	Seznam úkolů zadaných studentovi	- 3 -
Tab. 3.2	Stav izolace v závislosti na velikosti PI60	- 13 -
Tab. 3.3	Stav izolace v závislosti na velikosti DAR	- 14 -
Tab. 3.4	Stav izolace v závislosti na velikosti DD	- 14 -
Tab. 3.5	Štítkové údaje motoru	- 17 -
Tab. 3.6	Naměřené hodnoty izolačního odporu	- 17 -
Tab. 3.7	Naměřené hodnoty izolačního stavu	- 18 -
Tab. 3.8	Naměřené a vypočítané hodnoty	- 18 -
Tab. 3.9	Porovnání RMS hodnot odezev	- 23 -
Tab. 3.10	Přípustné hodnoty vibrací	- 31 -
Tab. 3.11	Výsledky měření vibrací	- 32 -

Úvod

Tato praktická bakalářská práce se zabývá popisem diagnostických zkoušek, což byla jen část procesu, kterým elektrické stroje procházely. Každý motor určený k opravě byl rozložen, a poté diagnostikován. Na základě diagnostických zkoušek, které jsou popsány v této práci, bylo rozhodnuto, které díly se vymění za nové a které se ponechají. Opravované motory byly nejčastěji asynchronní, ale přicházely rovněž synchronní a stejnosměrné stroje. Společnost HE se specializuje na opravu důlních motorů určených do nevýbušného prostředí. Některé motory byly svým provedením velice unikátní, a proto se při zkoušení těchto strojů přistupovalo individuálně s velkou pečlivostí.

Mým úkolem bude propojit nabyté teoretické znalosti s praktickými. Vzhledem k tomu, že tento dokument nenabývá charakteru klasické teoretické bakalářské práce, budu používat strukturu, která je předepsána v zadání bakalářské práce. Kromě popisu zaměření společnosti HE a seznamu úkolů chci hlavní zpracování soustředit do třetí kapitoly, kde budu rozebírat diagnostické metody teoreticky. Každá podkapitola je založena vždy na teoretickém základu, který je psán v trpném rodě, a na praktické zkušenosti, kterou popisují za sebe.

První podkapitolou je smyslové posouzení, kde se snažím uvést základní poruchy, se kterými jsem se setkal při vykonávání praxe. Poté je popsáno měření izolačního odporu a polarizačních indexů, včetně konkrétního měření na vysokonapětovém motoru. Dále je zde uveden teoretický popis měření odporu vinutí a také zkouška rázovou vlnou, u které jsou zobrazeny dva příklady a jejich srovnání. Zároveň zde uvádím bezdotykové a dotykové měření teplot se zaměřením na diagnostiku elektrických strojů. A v poslední řadě měření vibrací, které bylo nedílnou součástí zkoušení opravených motorů.

1 Popis zázemí a spolupráce studenta

1.1 Zaměření společnosti

Společnost HE má v České republice tři pobočky. Dvě se nacházejí v Opavě a třetí v Ostravě. Zaměřuje se na výrobu a opravu zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu. Většina výroby je soustředěna v Opavě na ulici Těšínská 2977/79C, kde se vyrábějí transformátorové soupravy, spínací soupravy, frekvenční měniče a svítidla. Vedle výroby se společnost HE soustřeďuje na opravu generátorů v Ostravě – Radvanicích. Odbornou praxi jsem vykonával v Opavě na ulici Komárovská. V tomto provozu se vyrábí vakuové stykače, ale především se zde opravují elektromotory a menší generátory. Motory přicházejí na servis a opravu většinou z dolů, které jsou v Moravskoslezském kraji a Polsku stále aktivní. Zároveň zde probíhá i výroba nových elektromotorů, která není sériová, ale spíše nárazová. Společnost HE zaměstnává přibližně 225 pracovníků, účastní se světových veletrhů a exportuje do zemí všech kontinentů kromě Austrálie.

1.2 Popis pracovního zařazení studenta

Jako student na praxi jsem vykonával úkoly, které mi byly zadány v rámci praktické bakalářské práce. Z důvodů respektování bezpečnostních předpisů na pracovišti, jsem byl u všech zkoušek v pozici sledování, zapisování naměřených dat a konzultování diagnostických metod. Ve své podstatě byla práce, kterou jsem vykonával, do jisté míry prací, která charakterizuje pozici zkušebního technika.

2 Seznam úkolů zadaných studentovi

Jelikož zadané úkoly byly ve formě provedení elektrických zkoušek v rámci diagnostiky elektrických strojů, nabývaly krátkých časových intervalů. Na druhou stranu byly často opakovány, což mělo za důsledek pochopení všech souvislostí v oblasti prováděné diagnostiky ve společnosti HE. Pro přehlednost jsou uvedeny úkoly v podobě diagnostických zkoušek v tabulce tab. 3.1 s jejich každodenní časovou náročností. Mnohdy byly výsledky měření diskutabilní, což si vyžádalo větší časové nároky, a proto jsou údaje v tabulce jen orientační.

Tab. 3.1 Seznam úkolů zadaných studentovi

Seznam úkolů	Časová náročnost
Vizuální kontrola	5 minut
Měření izolačního odporu	15 minut
Měření odporů vinutí	5 minut
Impulsní srovnávací zkouška	10 minut
Měření odporů tepelných senzorů	5 - 10 minut
Měření teploty termovizní kamerou	5 minut
Měření vibrací motoru	15 minut

3 Zvolený postup řešení zadaných úkolů

3.1 Smyslová posouzení

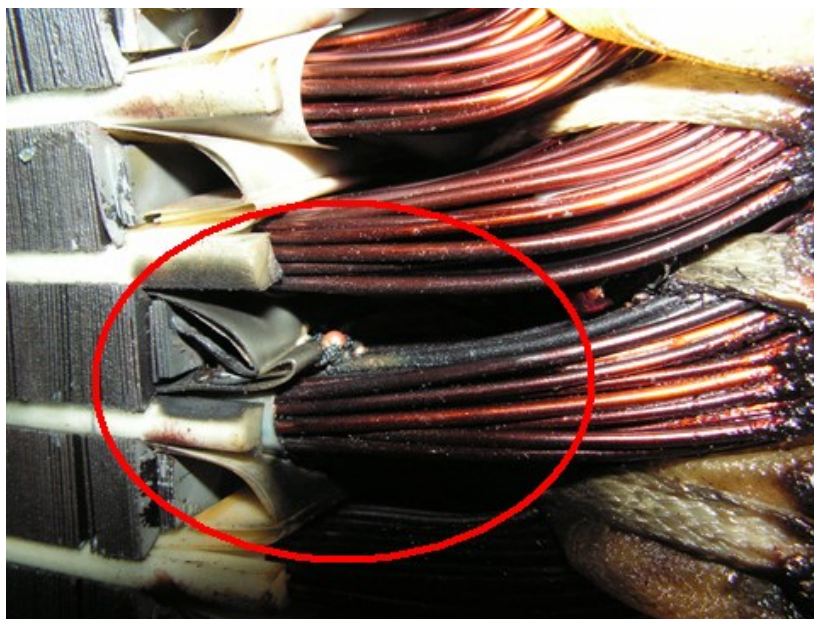
Ještě před tím, než je jakýkoliv stroj podroben testovací nebo funkční diagnostice, je důležité znát jeho genetiku a historii údržby. Hned vedle informací o motoru, tzn. v jakém prostředí stroj pracuje nebo z jakého důvodu byl zaslán na opravu, je třeba analyzovat momentální stav motorů na základě smyslového posouzení. Pomocí vizuální kontroly již rozložených motorů lze částečně určit, u jakých zkoušek obstojí anebo naopak. Díky této metodě lze mnohdy zjistit poruchu anebo upozornění na blížící se riziko. Při takovéto kontrole je sledováno především vinutí stroje, mechanické poškození kostry, statorových plechů, ložisek, hřídele anebo rotorových tyčí. Vzhledem k tomu, že většina motorů k opravě ve společnosti HE pochází z důlních oblastí, jsou tato poškození velmi častá. V motorech se rovněž vyskytuje prach, vlhkost a mastnota. Tyto negativní vlivy jsou lépe popsány níže s příloženou fotografií. U točivých zkoušek se uplatňují i další smysly, jako jsou sluch, hmat a čich.

Vinutí strojů jsou velmi důležitou součástí a proto je zapotřebí jim věnovat patřičnou pozornost. Při první kontrole statorových částí je zapotřebí si všimnout veškerých detailů. Častou poruchou bývá poškozená izolace, vlivem tepelných účinků v rámci přetížení anebo při nedodržení cyklu provozu stroje. Charakterizují ji popraskané bandáže izolace vývodu vinutí nebo zuhelnatělá izolace, což je zřetelné na obr. 3.1. Takové poškození nastává při průchodu nadproudu, kde zřejmě pochybily jistící prvky, které by měly proti těmto nežádoucím situacím včas zareagovat.



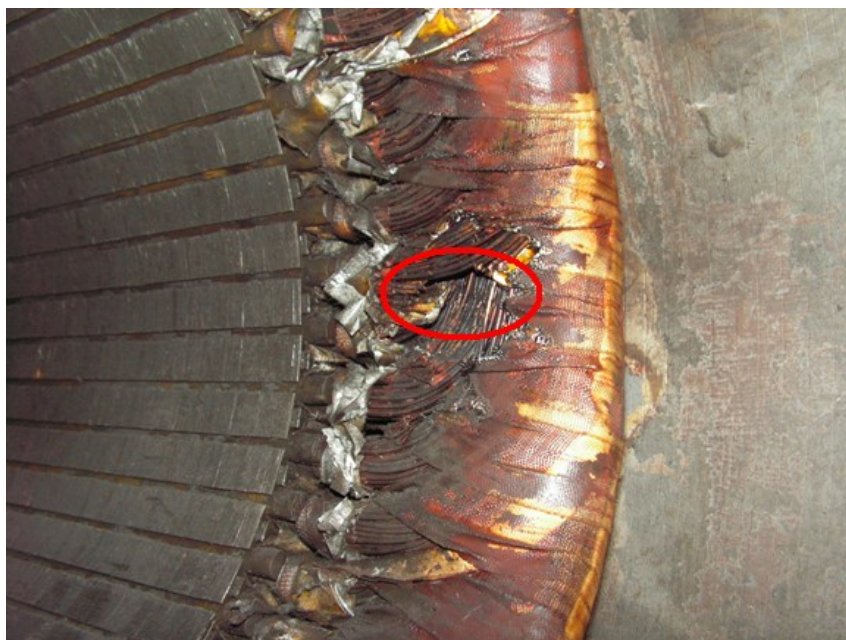
Obr. 3.1 Zuhelnatělá izolace

Dalším případem je motor (obr. 3.2), kde je vidět poškození izolace. Místo závitového zkratu je označeno červeným kruhem. Došlo zde k zuhelnatění izolace samotného vinutí. Součástí poškození je také uzávěr drážky (drážkový klín) a drážková izolace.



Obr. 3.2 Místo mezizávitového zkratu

Při zkratu může být poškozeno rovněž vinutí stroje, což vede k nesymetrii a disfunkčnosti celého motoru. Po deformaci izolace vodičů, tedy impregnačního laku, dochází k mezizávitovým zkratům a také k samotnému přetavení vodičů, což je červeně označeno na obr. 3.3. V takovém případě je nutná oprava a převinutí celé statorové části.



Obr. 3.3 Přetavení závitů

V úvodu této kapitoly bylo zmíněno, že ve vinutí stroje se rovněž objevuje mastnota. Ta je způsobena vnitřním proniknutím maziva, kterým jsou mazána ložiska motoru. Hřídele dosahují

velkých obvodových rychlostí, a mazivo se vlivem odstředivých sil dostává dovnitř stroje (obr. 3.4). Velmi negativně působí na izolační stav motorů. Tento druh znečištění izolace je velmi častý, což je jedním z důvodů servisu. V takových případech, kdy se nenalezne žádná jiná porucha, je statorové vinutí ošetřeno pomocí tlakového mytí a následně vysušeno.



Obr. 3.4 Mazivo uvnitř stroje

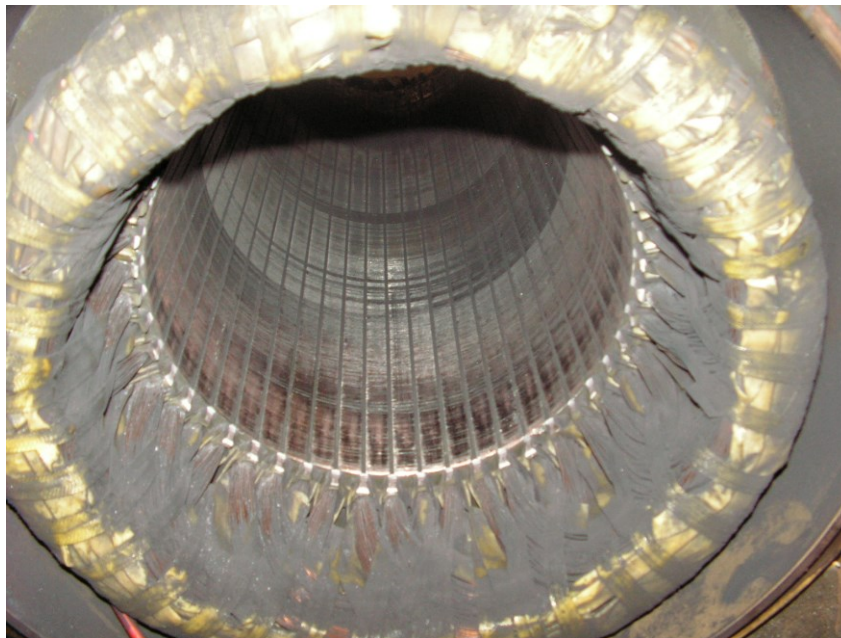
Při vykonávání praxe jsem se setkal i s velmi specifickým extrémním případem. Došlo zde zřejmě k pochybení v intervalech mazání ložisek. Údaje o pravidelnosti doplňování maziva bývají napsány na štítcích stroje (včetně typu konkrétního maziva). Bohužel se zákazník dopustil chyby. Motor byl po vyjmutí štítů plný maziva (obr. 3.5). V takovém případě nepomůže ani tlakové mytí, a proto byl stroj převinut.



Obr. 3.5 Motor přeplněný mazivem

Dalším případem znečištění vinutí je také prach a vlhkost. Motory na opravu a servis jsou většinou určené pro důlní činnost. Přestože jsou stroje uzavřeny, dostává se dovnitř uhelný prach. To ovšem není příčina zaprášení motoru na obr 3.6. U tohoto stroje pravděpodobně došlo k zadření rotoru

o stator, čímž vznikly kovové částice, které se usadily ve vinutí. V dolech je rovněž vysoká vlhkost vzduchu, která kondenzuje vně i uvnitř strojů. Ideálním řešením je opět umytí, vysušení a následné tlakové vyfoukání vinutí. Vlhkost uvnitř motoru způsobuje korozi a společně s prašností negativně ovlivňují izolační schopnosti motoru, o které podrobně vypovídá podkapitola 3.2.



Obr. 3.6 Zaprášené statorové vinutí

Po vizuální stránce lze rovněž určit mechanická poškození motoru. Taková poškození nastávají při jejich špatném provozu a při špatné manipulaci. S motory by mělo být manipulováno tak, aby nedocházelo k jejich vnitřním a vnějším deformacím. Příkladem může být motor s poškozeným pláštěm na obr. 3.7, který je v takovém stavu provozu neschopný.



Obr. 3.7 Motor s poškozeným pláštěm

U statoru může také dojít k mechanické deformaci. Zejména poškozením plechů, ve kterých je usazeno izolované vinutí. Jednou z poruch je posunutí nebo ohnutí statorových plechů. Pokud nastane taková situace, může dojít k narušení izolace a k zemnímu spojení skrze kostru. Ulomené plechy lze vidět na obr. 3.8. Oprava statorové části spočívala ve výměně plechů a převinutí motoru.



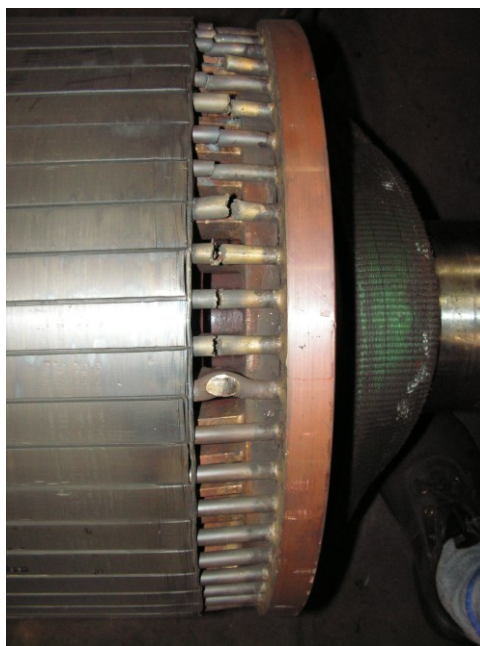
Obr. 3.8 Ulomené části statorových plechů

Dalším případem je zhavarovaný motor (obr. 3.9), kde došlo k mechanickému poškození statorových plechů. Poškození mohlo vzniknout například při uvolnění drážkového klínu do rotující části anebo při uvolnění vyvážky z rotoru. Další možností poškození je například výskyt nečistot v motoru.



Obr. 3.9 Mechanické poškození statorových plechů

Dosud zde byly zmiňovány jen poruchy statoru. Druhou podstatnou částí stroje je rotor, který také podléhá poruchám. U těch mechanických je například závažné přerušení rotorové tyče, čímž vznikne nesymetrie magnetického obvodu, což se projeví na chodu stroje. Na obr. 3.10 lze vidět hned několik přerušených rotorových tyčí. Vzhledem k tomu, že takový rotor má při jmenovitých otáčkách 3000 min^{-1} velký moment setrvačnosti, mohlo by dojít ke skokovému zastavení z pohledu zátěže. Přerušení tyčí pak nastalo vlivem mechanického rázu, kterému podlehl slabá místa opotřeбенého materiálu.



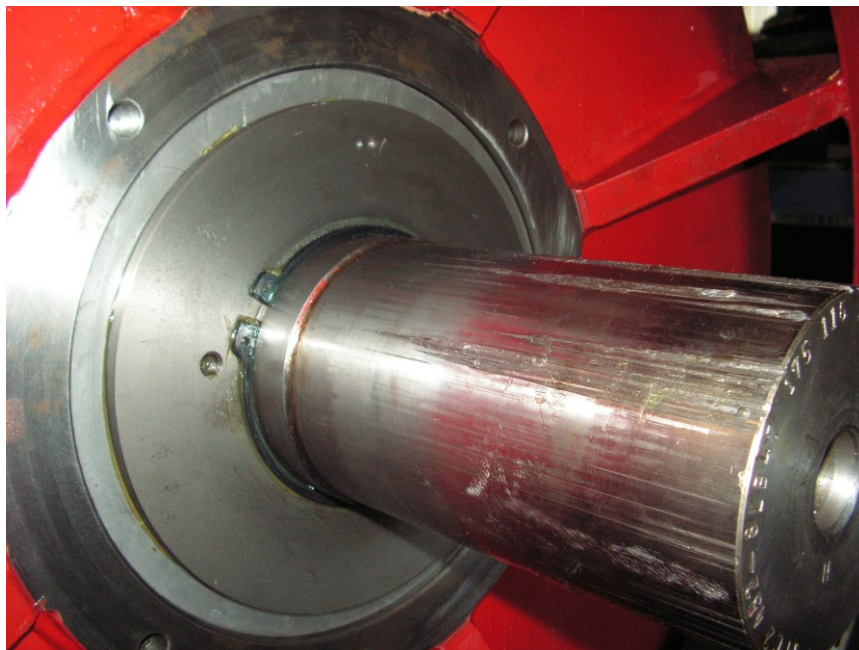
Obr. 3.10 Přerušení rotorových tyčí

Nosným prvkem rotoru je hřídel, která též podléhá mechanickým vlivům. Například na obr. 3.11 lze vidět ukroucenou hřídel. Takový stav je nepřijatelný, hřídel se musí vyměnit.



Obr. 3.11 Ukroucená hřídel

Jiným případem je motor (obr. 3.12), kde poškození hřídele nastalo v důsledku odebrání spojky. Spojka se zachytila o hřídel. Postupným tažením spojky po hřídeli vznikly rýhy a nenávratné poškození hřídele.



Obr. 3.12 Poškození hřídele odebráním spojky

Často poruchová jsou rovněž ložiska, která se mění za nová téměř u každé opravy motoru. Jednou z poruch ložiska bývá jeho zadření, které je viditelné na obr. 3.13. Došlo zde k roztržení klece, která drží valivá tělíska ve správné poloze. Takový stav je nepřijatelný a ložisko musí být vyměněno za nové.



Obr. 3.13 Zadřené ložisko

U některých poškození lze těžko přijít na příčinu. Na obr. 3.14 lze vidět motor, kterému se ulomila část ventilátoru a průchodky. Zpravidla za to může manipulace a zacházení s motory v dolech, což se dá pochopit vzhledem k rozsáhlosti a omezenosti důlních chodeb. Motory určené do prostředí s nebezpečím výbuchu jsou konstruovány tak, aby případný výbuch plynu proběhl jen uvnitř motoru a neohrožoval okolí, což rozhodně nesplňuje svorkovnice stroje určeného pro důlní mechanismy na obr. 3.15. Proto se tato svorkovnice musela vyměnit za novou.



***Obr. 3.14** Motor s ulomenou průchodkou a ventilátorem*



***Obr. 3.15** Poškozená svorkovnice*

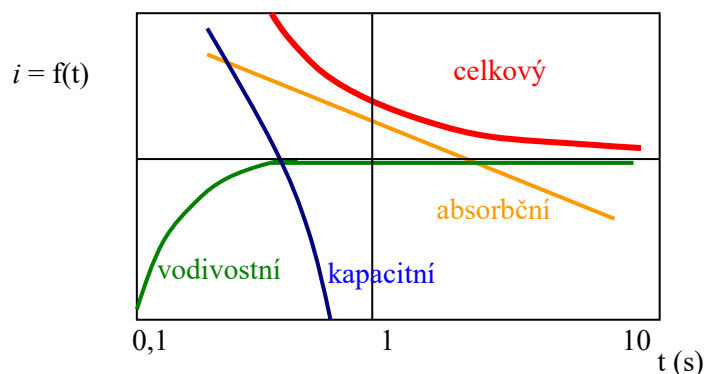
3.1.1 Využití ostatních smyslů

Nesmí být zapomenuto ani na další lidské smysly jako jsou sluch, hmat a čich. Při diagnostice mezizávítového zkratu pomocí rázového generátoru je někdy slyšet výbojovou činnost. U funkčních zkoušek je ideální stroj tichý. Při spouštění a chodu motoru je dobré poslouchat reakci v otáčivém režimu. Typickým pisklavým zvukem se například projevuje zaběhávání nových ložisek. Ostatní bytelné a drnčivé zvuky jsou nežádoucí a na jejich příčinu se musí přijít. Tyto zvuky často doprovázejí vibrace, které jsou rozebrány v podkapitole 3.6. Podobně lze odhadnout teplotu pláště a štítů po určité době v chodu. Přesně se pak teplota měří pomocí termovizní kamery. V poslední řadě využíváme čich, například v situacích, kdy se zahřívá nebo pálí impregnační lak.

3.2 Měření izolačního stavu

3.2.1 Fyzikální podstata a základní principy měření

Izolační stav motoru se posuzuje podle velikosti hodnoty izolačního odporu, který se měří nepřímou metodou na základě přiloženého stejnosměrného napětí a proudu procházejícího izolací. Proud odebíraný ze zdroje však nemá pouze jednu složku. To je možné vidět na následujícím grafu (obr. 3.16).



Obr. 3.16 Rozložení proudů na začátku měření (1)

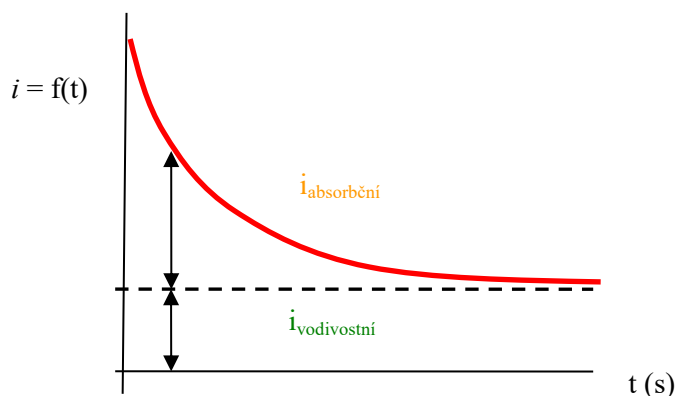
i_c – Kapacitní proud – Vzhledem k tomu, že izolace představuje dielektrikum mezi kostrou stroje a vinutím, má rovněž svou kapacitu, což je důvod k využití stejnosměrného napětí pro měření izolačního odporu. Tato složka proudu nabíjí kapacitu izolace. Kdyby byl využit střídavý zdroj energie, kapacitní proud by neustále měnil polaritu, čímž by docházelo k nabíjení a vybíjení. Takový stav pro měření izolačního odporu je nežádoucí. Kapacitní proud je závislý na vnitřním odporu zdroje. Při připojení je jeho hodnota maximální a prudce klesá až do chvíle, kdy je dosaženo požadovaného napětí. (2) (1)

i_a – Absorpční proud – Někdy také nazývaný proud polarizační. Je to proud způsobený polarizačními pochody v dielektriku izolace. Proud pozvolna klesá od počáteční hodnoty k nule. Uvádí se, že tento proud může postupně klesat až několik hodin, nebo dokonce i desítek hodin po připojení napájecího napětí. Největší vliv na jeho hodnotu má obvykle stav, kvalita a typ použitého pojiva izolace. (2) (1)

i_v – Vodivostní proud – Nejvýznamnější složkou celkového proudu je vodivostní proud, který protéká průřezem izolace. Je časově závislý u vlhkých izolací a zpočátku velmi rychle roste do ustálené hodnoty. Takový proud způsobuje činné ztráty a je doprovázen povrchovým proudem. (2) (1)

i_{celk} – Celkový proud – Ve své podstatě je to suma všech složek proudů, které jsou uvedeny výše. Je to proud odebíraný ze zdroje elektrické energie.

Pro změření izolačního odporu jsou tedy nejdůležitější absorpční a vodivostní proud (obr. 3.17).



Obr. 3.17 Poměrové rozložení celkového proudu (1)

3.2.2 Zdánlivý izolační odpor

Izolační odpor dosahuje na začátku měření menších hodnot než na konci. Je to způsobeno především kapacitním proudem, který klesá ze svého maxima při nabíjení kapacity izolace. To je také jeden z důvodů, proč délka trvání měření nabývá deseti minut. Dalšími důvody jsou výpočty polarizačních indexů a test vybíjení dielektrika, které jsou popsány níže. Po celou dobu tohoto měření zůstává napětí konstantní a mění se pouze hodnoty elektrického proudu. Pomocí Ohmova zákona je poté dopočítán odpor. Je důležité definovat, za jakých okolností může být stroj zkoušen. Výsledek ovlivňuje celá řada faktorů. Nejdůležitější jsou teplota okolí a izolace, která by měla být při měření ustálená. Dalšími vlivy mohou být například vlhkost a nečistoty (prach, vylitý olej, mazivo, třísky) anebo také samotné připojení svorek měřicího přístroje ke svorkovnici, kde se může vyskytnout díky nedokonalému kontaktu přechodový odpor. Chyba měření může nastat rovněž při připojení kladné svorky na kostru stroje. Může totiž nastat situace, kdy je svorka připevněna na část kostry stroje, která je nabarvena elektroizolační barvou. Za takového stavu je výsledek neobjektivní. (2) (1)

3.2.3 Polarizační indexy

Součástí měření izolačního systému je rovněž výpočet polarizačních indexů, které vycházejí z naměřených hodnot odporů. Pomocí nich se dá také určit stav (znečištění, vlhkost a degradace) izolace daného stroje (tab. 3.2).

Tab. 3.2 Stav izolace v závislosti na velikosti PI_{60} (1)

PI_{60}	Stav izolace
< 1,5	velmi špatný (vlhko, znečištění, zestárnutí)
1,5 – 2,5	navlhlá, znečištěná
2,5 - 4	suchá a čistá
> 4	velmi suchá a čistá

Rozlišujeme dva indexy polarizace p_{i60} a p_{i600} . Udávají je poměry izolačních odporů v různých časech (vzorec (3.1) a vzorec (3.2)). Za jeden z dalších polarizačních indexů můžeme považovat dielektrický absorpční poměr (Dielectric Absorption Ratio), značený jako DAR. Výpočet je analogický jako u předchozích indexů polarizace. Je dán poměrem odporů v časech 60 a 30 sekund (vzorec (3.3)). Existují i jiné poměry, avšak z důvodů porovnání měření na jiných motorech je lepší dodržovat stejný. Kvalitu izolace na základě změřeného dielektrického absorpčního poměru popisuje tab. 3.3. (1)

$$p_{i60} = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} \quad (3.1)$$

$$p_{i600} = \frac{R_{600s}}{R_{60s}} \quad (3.2)$$

$$DAR = \frac{R_{60s}}{R_{30s}} \quad (3.3)$$

Tab. 3.3 Stav izolace v závislosti na velikosti DAR

DAR	Stav izolace
< 1,25	nedostatečný, nebezpečný
< 1,6	dobrý
> 1,6	velmi dobrý, výborný

3.2.4 Test vybíjení dielektrika

Posledním prvkem měření je test vybíjení dielektrika, značen také jako DD. Vzhledem k tomu, že kapacita dosáhla svého maximálního náboje, musí se také vybít. DD je bezrozměrná veličina, která závisí na proudu po první minutě měření, na napětí a kapacitě izolace (vzorec (3.4)). Pomocí testu vybíjení dielektrika se dá určit, jako u předchozích indexů polarizace, stav izolace (tab. 3.4). Pravdou je, že ne vždy se izolace vybije zcela úplně, a proto je dobré předejít případnému úrazu připojením vinutí k vybíjecímu odporu po měření. (2)

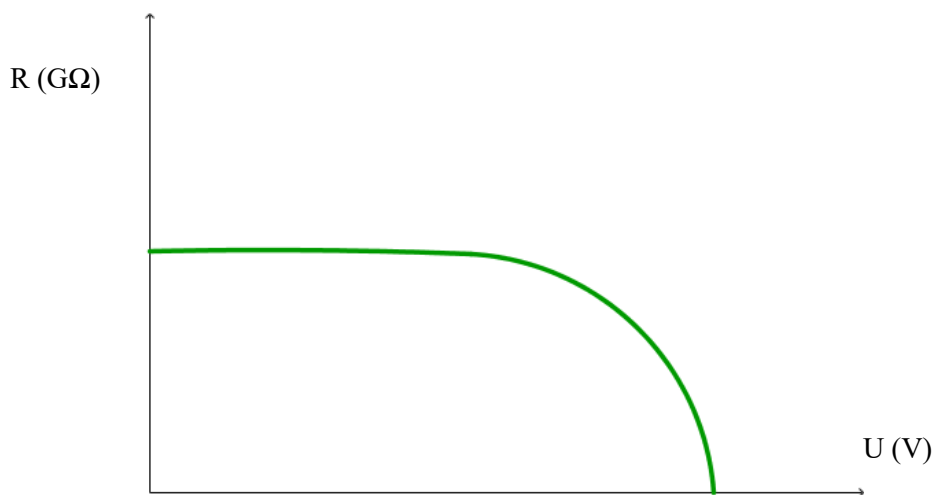
Tab. 3.4 Stav izolace v závislosti na velikosti DD

DD	Stav izolace
DD > 7	velmi špatný
7 > DD > 4	špatný
4 > DD > 2	nejasný
DD < 2	velmi dobrý

$$DD = \frac{I_{1min}}{U \cdot C} \quad (3.4)$$

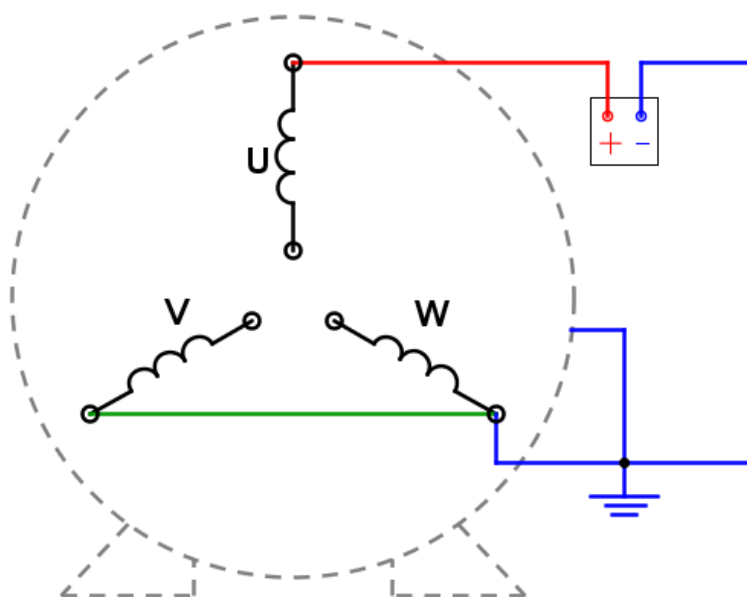
3.2.5 Měření izolačního odporu vinutí statoru

Aby se dosáhlo objektivního měření, musí se správně zvolit velikost přiloženého napětí. To by nemělo výrazně překračovat jmenovitý štítkový údaj. Kdyby se tak stalo, mohlo by dojít k průrazu dielektrika, což zobrazuje graf na obr. 3.18. Zde je vidět závislost odporu na zvyšovaném stejnosměrném napětí. Zpočátku dosahuje konstantních hodnot, poté ale začíná prudce klesat. Velikost průrazného napětí izolace lze odhadnout grafickou extrapolací křivky. (1)



Obr. 3.18 Závislost izolačního odporu na napětí

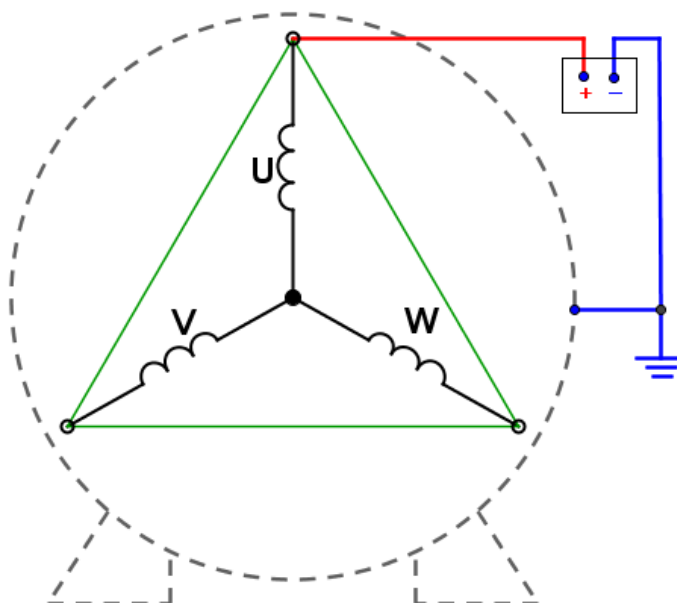
Ještě před aplikací zkoušky je třeba správně připojit měřící přístroj ke stroji. Nejlepším způsobem, jak změřit izolační odpor, je provést tuto zkoušku na každé fázi zvlášť. U takového měření musí být při zapojení vinutí do hvězdy uzel rozpojen. Svorka s označením záporného pólu ze zdroje je připojena na jeden konec fáze a svorka kladného pólu ke kostře motoru, která je vodivě spojena se zemí. Zároveň musí být ostatní fáze připojené k zemi, tedy ke kostře motoru (obr. 3.19). (1)



Obr. 3.19 Zapojení při měření izolačního stavu každé fáze zvlášť

Izolační odpor se pak měří proti fázím a proti kostře stroje najednou. Takové měření je přesnější a dokáže upozornit například na mezifázový zkrat, který by se projevil ztrátou napětí. Ve společnosti HE se ovšem nepoužívá a na zjištění mezifázových zkratů a jiných poruch jsou aplikovány jiné, časově méně náročné diagnostické metody.

Po celou dobu své praxe jsem uplatňoval měření izolačního odporu asynchronních a synchronních strojů se zapojením do hvězdy (obr. 3.20) nebo se zapojením do trojúhelníka.



Obr. 3.20 Zapojení při měření izolačního stavu všech fází

Setkal jsem se s nejrůznějšími typy motorů. Po vizuální kontrole se obvykle zjistí předběžný odhad stavu vinutí. Občas se stane, že i přes veškeré znečištění a vlhkost se izolace motoru na základě celého měření jeví v dobrém stavu. V takovém případě se musí pomocí ostatních zkoušek vyhodnotit budoucí opravy motoru. Častým případem bývají stroje s nízkou hodnotou izolačního odporu, které posílají zákazníci na opravu. Odporů takového izolačního systému většinou dosahují hodnot v řádech megaohmů. Teoreticky by stroj s touto izolací fungoval správně a nejevil by známky poškození. Vzhledem k tomu, do jakého prostředí se vrací, se musí zohlednit prognóza izolačního stavu. Za těchto podmínek motor putuje na tlakové mytí, a poté do elektrické pece, kde je kompletně vysušen při teplotě 130 °C. Následně je dopraven zpět na zkušebnu, kde je aplikováno toto měření znova. Většinou se hodnota odporu izolace zvětší. Po absolvování zkoušky se tedy rozhodne, zda-li bude motor převinut, nebo bude podroben střední opravě.

Jako příklad zde uvádím měření izolačního stavu motoru, jehož štítkové údaje jsou v tab. 3.5.

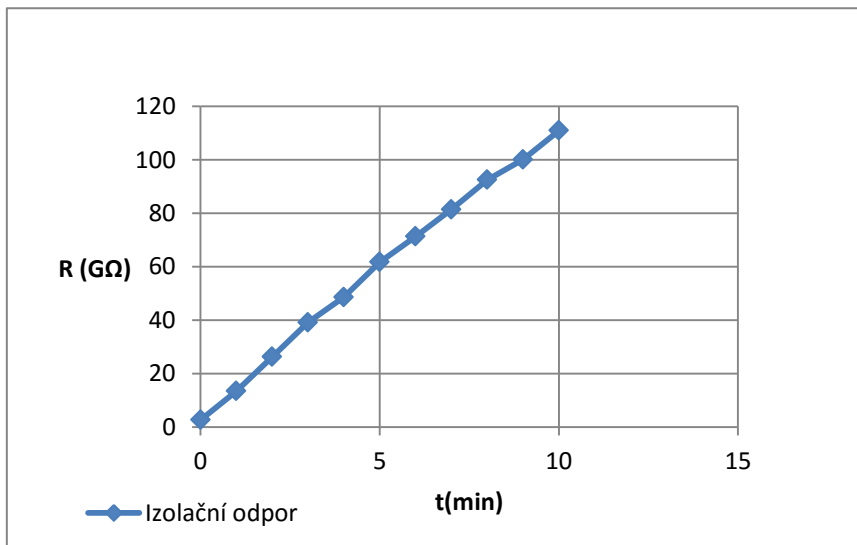
Tab. 3.5 Štítkové údaje motoru

Typ	14F 5000 – 8	IP	54	izolace	F
v.č.	160563	IM	3001	zatížení	S1
U (V)	6000	P (kW)	200	f (Hz)	50
I (A)	283	ot. (min⁻¹)	740		

Jelikož jmenovité napětí nabývá hodnoty 6000 V, zvolil jsem pro měření izolačního stavu nejvyšší možnou volbu 5000 V. Uvádím zde graf (obr. 3.21), kde je vidět závislost izolačního odporu na čase. Odečítání naměřené hodnoty odporu probíhalo vždy po jedné minutě. V grafu je vidět rostoucí průběh, což je v případě měření izolačního odporu žádoucí. Je to způsobeno klesajícími hodnotami kapacitního a absorpčního proudu.

Tab. 3.6 Naměřené hodnoty izolačního odporu

t (s)	R (GΩ)
0,25	1,523
0,5	3,974
1	13,39
2	26,24
3	39,09
4	48,6
5	61,7
6	71,3
7	81,4
8	92,5
9	100,1
10	111



Obr. 3.21 Graf závislosti odporu na čase

Výpočet:

$$p_{i60} = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} = \frac{13,39}{1,523} = 8,79$$

$$DAR = \frac{R_{60s}}{R_{30s}} = \frac{13,39}{3,974} = 3,37$$

$$DD = \frac{I_{1\min}}{U \cdot C} = \frac{0,23 \cdot 10^{-3}}{5000 \cdot 116,4 \cdot 10^{-9}} = 0,23$$

Tab. 3.7 Naměřené hodnoty izolačního stavu

R (GΩ)	111,00
I _{1min} (A)	0,00023
C (nF)	116,2
U (V)	5000

Tab. 3.8 Naměřené a vypočítané hodnoty

	Naměřené	Vypočítané
DAR	3,22	3,37
PI	8,29	8,79
DD	0,58	0,23

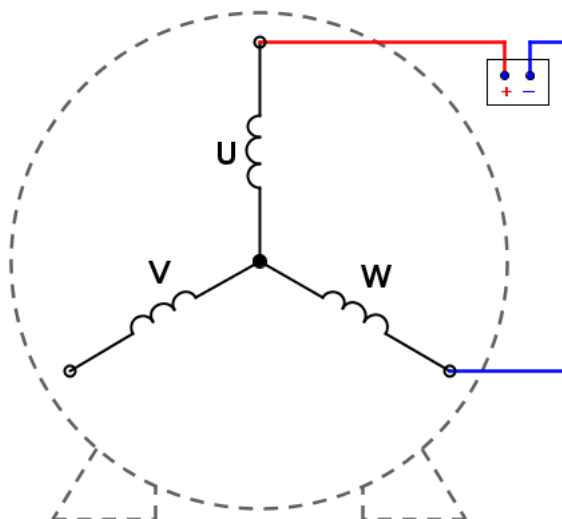
Dále zde uvádím porovnání vypočítaných a naměřených hodnot polarizačních indexů a vybíjení dielektrika. Po všech stránkách je izolace vinutí vysokonapětového motoru ve skvělém stavu. Svědčí o tom především vysoká hodnota izolačního odporu, hodnoty polarizačních indexů a velmi nízká hodnota testu vybíjení dielektrika.

3.3 Měření odporů vinutí

Asynchronní a synchronní stroje jsou charakteristické třífázovým vinutím uloženým ve statoru. Nedílnou součástí zkoušek je měření odporu vinutí každé fáze. Pomocí Ohmovy metody je odpor dopočítán na základě přiloženého stejnosměrného napětí a průchodu proudu vinutím. Tato zkouška poukazuje na symetrii statorového obvodu. Již před měřením se dá rozpoznat podle typu a velikosti stroje, jak velký odpor bude, což pomáhá ke správnému zvolení rozsahu, se kterým se měří. U větších motorů bývá odpor fází v řádech miliohmů, kdežto u těch menších v řádech jednotek ohmů. Je to způsobeno velikostí průřezu vodičů (vzorec (3.5)), ve kterém platí nepřímá úměra mezi odporem a průřezem vodiče.

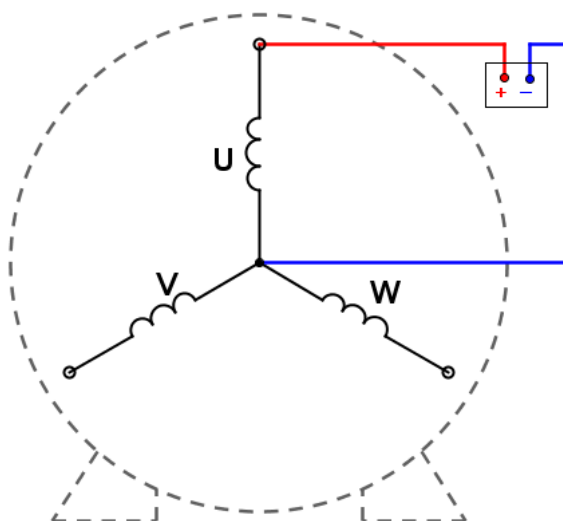
$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (3.5)$$

U motorů, které nemají vyvedené začátky vinutí, se musí měřit odpor mezi fázemi, což zobrazuje obr. 3.22.



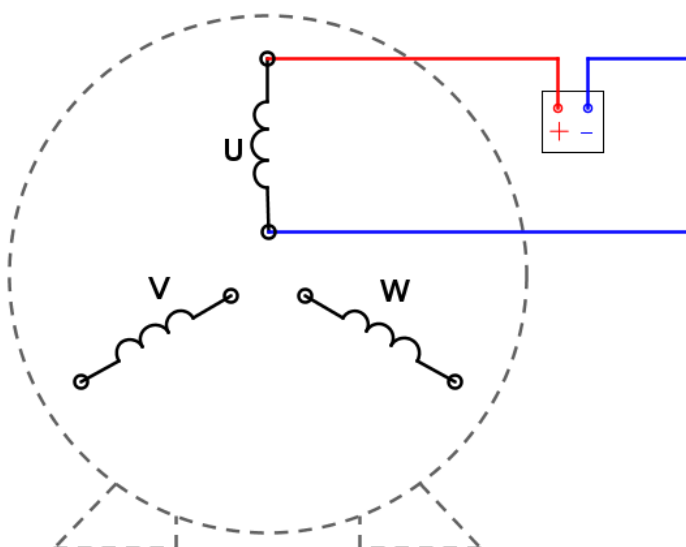
Obr. 3.22 Zapojení při měření odporu mezi fázemi

Pokud ovšem mají vyvedený uzel, je dobré měřit tento odpor mezi začátkem vinutí a uzlem u každé fáze zvlášť. S takovýmto zapojením se setkáme většinou u generátorů. Takové zapojení je ilustrováno na schématu (obr. 3.23).



Obr. 3.23 Zapojení při měření odporu proti uzlu

Pokud jsou vyvedeny ve svorkovnici začátky i konce vinutí, je dobré změřit jednotlivě odpor každé fáze. Takové zapojení popisuje schéma na obr. 3.24. Podstatou měření je tedy ověření odporové symetrie vinutí.



Obr. 3.24 Zapojení při měření odporu každé fáze zvlášť

Při vykonávání praxe jsem měřil odpory vinutí pomocí měřicího přístroje Mikroohmmetr C.A.6250. Tento přístroj je velice jednoduchý na ovládání a jeho přesnost je mnohem větší než u běžných multimetrů. Samozřejmě, že někdy vzhledem k malým rozměrům motoru a svorkovnice se nedají fyzicky připojit svorky měřicího přístroje. V takovém případě jsem odpory vinutí měřil multimetrem, abych aspoň orientačně věděl, jestli je zachována symetrie. Pro její úplné ověření je následně využita aplikace impulsní srovnávací zkoušky, kterou podrobně popisuje podkapitola 3.4.

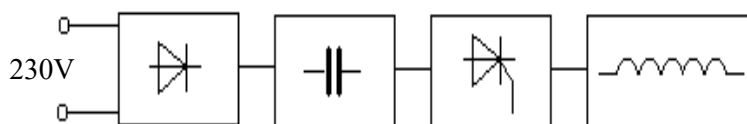
3.4 Impulsní srovnávací zkouška

Zjištění stavu izolace se věnovala podkapitola 3.2, avšak pomocí této metody se dá získat pouze informace, zda-li je izolační stav dobrý nebo naopak. Pro bližší určení poruchy izolace a vinutí stroje se využívá metoda rázové vlny.

Hlavní princip zkoušky spočívá v porovnání odezev dvou vinutí na napěťové namáhání. Zkouška je zařazována do testovací diagnostiky s podmíněně destruktivními účinky. Zdrojem napětí je rázový generátor. Odezvy vinutí na napěťové namáhání jsou sledovány na dvoukanálovém osciloskopu, na kterém se zobrazí oba průběhy napětí sinusového tlumeného charakteru, který závisí na parametrech vinutí, tzn. elektrickém odporu, kapacitě a indukčnosti. Nesymetrii tedy poznáme na základě rozdílu okamžitých hodnot průběhů napětí na stínítku osciloskopu. (1) (3)

Při aplikaci této zkoušky je možno odhalit nesymetrii vinutí, mezizávitové zkraty, mezifázové zkraty, odlišný počet závitů nebo vodiivé zemní spojení na kostru motoru. Pokud se oba dva průběhy impulsního napětí nepřekrývají, pravděpodobně došlo k jedné z těchto poruch. Může také nastat situace, že by měla obě vinutí identickou poruchu. Při tomto stavu by se odezvy na napěťové namáhání překrývaly. Tento stav je ovšem velmi nepravděpodobný. (1) (4)

Popis rázového generátoru je ilustrován na schématu (obr. 3.25). Je připojen na fázové napětí 230 V, které je usměrněno. Dalším prvkem generátoru jsou kondenzátory. Právě z tohoto důvodu je použito stejnosměrné napětí. Kondenzátory jsou nabity v kladné půlplně napájecího napětí. Následuje vybití náboje do vinutí, což je způsobeno akčním členem. Tento prvek je zastoupen u rázového generátoru tyristory. Vybíjení nastává v záporné půlplně napájecího napětí a jeho četnost způsobuje frekvence sítě. (3)

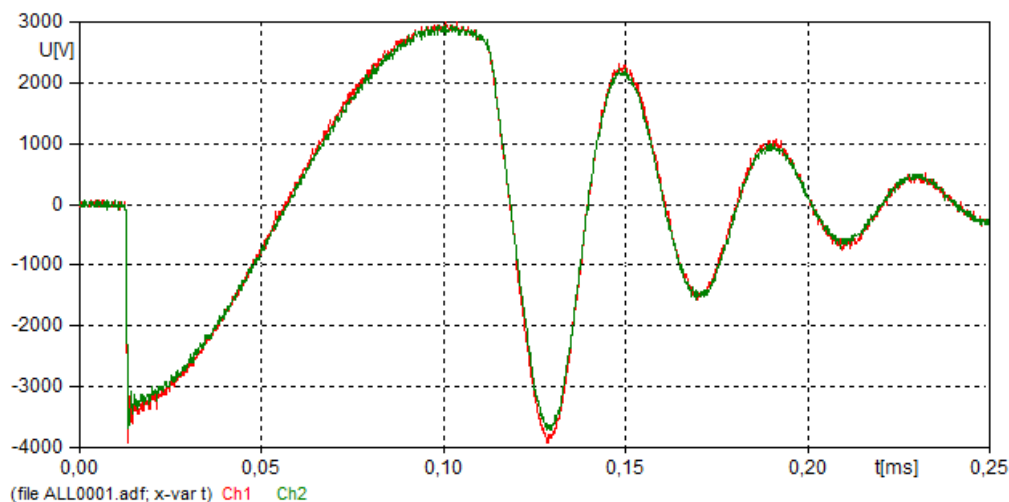


Obr. 3.25 Schéma rázového generátoru

Ve společnosti HE jsem tuto zkoušku aplikoval téměř každý den. Vzhledem k počtu motorů, které musí touto zkouškou projít a vzhledem k časové náročnosti jejich opravy, jsem využíval pouze vizuálního odečtení ze stínítka osciloskopu. V průběhu mé praxe jsem pracoval s rázovým generátorem PSG 212A, ze kterého byly vyvedeny tři svorky na fáze motoru a jedna zemnicí, určená k připojení ke kostře. Nutno podotknout, že impulsní srovnávací zkouška probíhá vždy jen na dvou vinutích motoru. Před každou zkouškou jsem musel zkontrolovat, jestli je stroj řádně zapojen. Ve většině případů jsem zkoušený motor zapojoval do hvězdy, nicméně naskytly se případy, ve kterých bylo nutné měřit v zapojení do trojúhelníku z důvodu nemožného rozpojení. Tři červené vodiče jsou připojeny ke koncům vinutí stroje a černý zemnicí vodič je připojen k vodiivé části kostry motoru. Měření pak probíhá jednak proti kostře, jednak proti třetí fázi. Při každé zkoušce jsem musel zvážit volbu velikosti napětí. Ve společnosti HE jsem používal minimální hodnotu $2U_N + 1 \text{ kV}$.

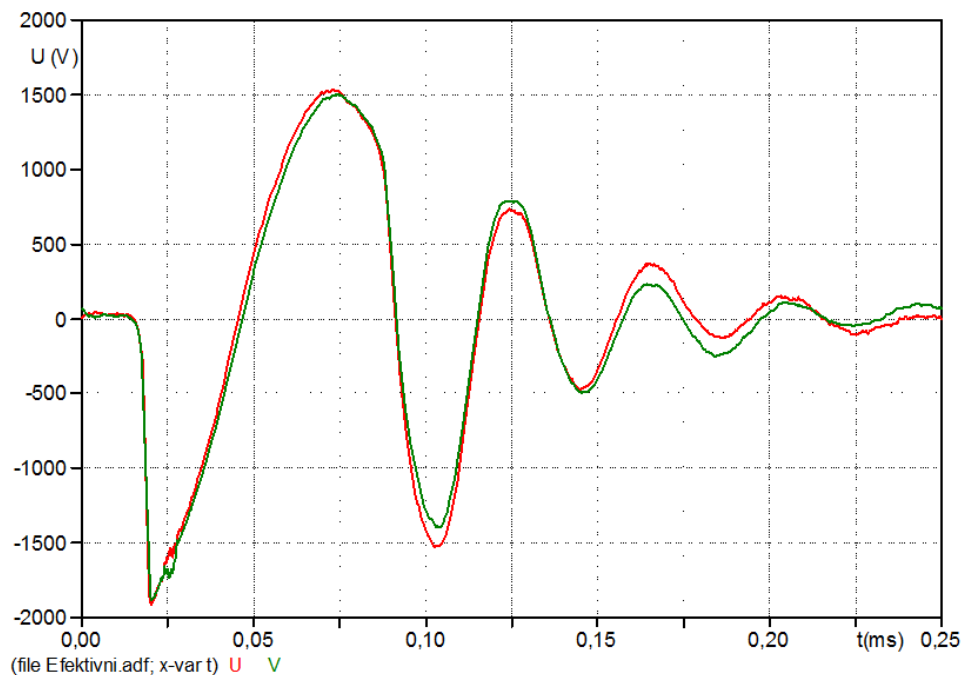
3.4.1 Příklady měření

Uvádím zde celkem dva případy motorů, které byly podrobeny zkoušce rázovou vlnou. V tom prvním chci poukázat na motor bez poruchy. Jedná se o asynchronní motor, u kterého jsem odečtení průběhů provedl pouze vizuálně. Zachycené průběhy napětí jsem uložil na přenosné datové médium, a následně zpracoval v programu PLOTXWin.

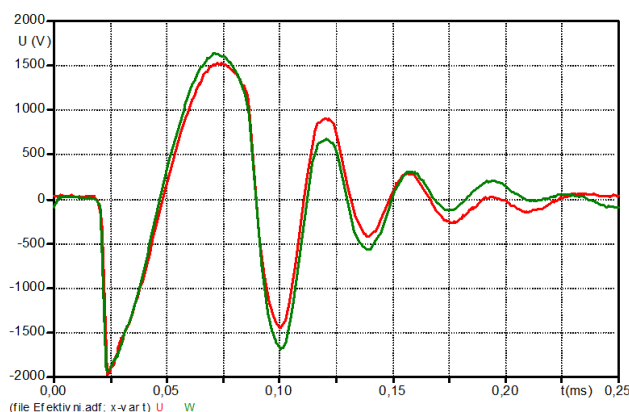


Obr. 3.26 Odezvy na napět'ové namáhání motoru bez poruchy

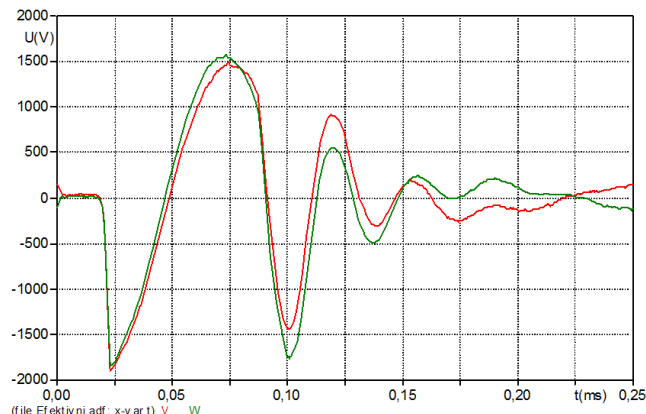
Ve druhém případě jde o motor, jehož vinutí je poškozeno. Průběhy napětí znázorňují obr. 3.27 až obr. 3.29. Již při pohledu na rozdílné okamžité hodnoty je jasné, že došlo k poruše stroje. Při vykonání této zkoušky motoru byla rovněž slyšitelná a viditelná výbojová činnost mezi závitů vinutí.



Obr. 3.27 Odezvy na napět'ové namáhání fází U - V



Obr. 3.29 Odezvy fází U - W



Obr. 3.28 Odezvy fází V - W

V některých náročnějších případech, kde byla vyžádána přesná diagnostika ze strany zákazníka, jsem využíval metodu integrální difference namodelovanou v programu LABview. Do tohoto vytvořeného modelu jsem nahrál soubory obsahující diskrétní hodnoty signálů z obou kanálů digitálního osciloskopu. Matematický model určil efektivní hodnoty obou průběhů, které od sebe odečetl. Pokud je rozdíl nenulový, nastala porucha. V souvislosti s měřeným motorem jsou v tab. 3.9 uvedeny efektivní hodnoty odezev na napětíové namáhání a jejich rozdíl.

Tab. 3.9 Porovnání RMS hodnot odezev

Fáze	U_{rms1} (V)	U_{rms2} (V)	ΔU_{rms} (V)
U-V	757,48	742,73	14,76
U-W	737,01	774,78	37,77
V-W	720,07	749,8	29,73

Tato zkouška se provádí jak u motorů určených k opravě nebo revizi, tak u zcela nových kusů, kde se ověřuje symetrie v průběhu výroby.

Při vizuálním posouzení motoru v prvním případě se vinutí a izolace zdály v dobrém stavu. V grafu, který je vidět na obr. 3.27, se oba průběhy překrývají. Proto jsem usoudil, že statorové vinutí je bez poruchy. Takový motor je podroben střední opravě, která zahrnuje tlakové mytí, následně pak vysušení.

Naproti tomu u druhého motoru je zcela evidentní porucha ve vinutí, což potvrzuje jednak vizuální odečtení průběhů napětí na osciloskopu, jednak nenulový rozdíl efektivních hodnot. Na základě těchto rozdílů uvedených v tab. 3.9, lze usoudit, že vinutí fáze W je jednoznačně poškozeno, pravděpodobně v důsledku mezizávitového zkratu. V takovém případě podléhá stroj generální opravě, jejíž součástí je převinutí motoru.

3.5 Měření teploty

Tato kapitola je pojata trochu odlišným způsobem než kapitoly předešlé. Nejprve se bude věnovat bezdotykovému měření teploty. V druhé části pak budou popsány tepelné senzory, které se nejčastěji vyskytují a používají v elektrických motorech.

Teplota je skalární fyzikální veličina, která je mírou termální energie obsažené v jakémkoliv objektu. (3) Měření teploty je realizováno mnoha metodami, které se dají rozdělit do dvou základních skupin. Jsou to bezdotyková a dotyková měření teploty.

Přenos tepla se rozděluje do tří základních skupin. Přenos tepla vedením, prouděním a sáláním. Jelikož chci v této kapitole především poukázat na bezdotykové měření teploty termovizní kamerou, přikládám teoretický rozbor pouze pro přenos tepla sáláním.

3.5.1 Bezdotykové měření

3.5.1.1 Přenos tepla sáláním

Každé neprůzračné těleso, které má větší teplotu než 0 K je zdrojem tepelné energie ve formě elektromagnetického záření. Na základě této skutečnosti se provádí všechna bezdotyková měření. Na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním probíhá tento přenos energie také ve vakuu. Je založen na elektromagnetické emisivitě a absorpci. Při výměně energie ve formě elektromagnetického záření dochází k jejímu emitování, absorpci anebo průchodu povrchem tělesa. Při měření teploty povrchu je důležitá pouze jeho emitovaná tepelná energie. Ta je stejně jako světelná energie tvořena pohybem fotonů. Tepelné elektromagnetické záření pak nabývá hodnot vlnové délky v rozsahu od 2 μm do 25 μm . Pomocí detektorů umístěných v pyrometrech nebo termovizních kamerách je uskutečněno měření teploty na objektech. Tyto měřicí přístroje jsou schopny měřit teplotu v rozsahu od - 40 $^{\circ}\text{C}$ do 10 000 $^{\circ}\text{C}$. Přenos tepla sáláním je popsán dvěma zákony. Vyzarování tepelné energie z povrchu tělesa charakterizuje Stephan – Boltzmannův zákon. (3) (5)

$$W = \delta \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (3.6)$$

W – hustota zářivého toku šedého tělesa [Wm^{-2}]

ε – emisivita

δ – Stefan – Boltzmanova konstanta = 5,6697 [$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$]

T – absolutní teplota tělesa [$^{\circ}\text{K}$]

Hodnotu vlnové délky tepelného záření pak určuje Wienův zákon.

$$\lambda = \frac{b}{T} \quad (3.7)$$

b – Wienova konstanta = 2897 [$\mu\text{m} \cdot \text{K}$]

T – absolutní teplota tělesa [$^{\circ}\text{K}$]

Energie, která je vyzařována z povrchu těles, je charakterizována veličinou nazývanou emisivita. Na základě emisivity jsou rozlišovány tři typy povrchů. Jedním z nich je povrch absolutně černého tělesa. Je definován jako teoretický povrch, jehož parametry jsou v dnešním světě nereálné. Jeho emisivita je jednotková, což znamená, že veškerá energie, která dopadne na povrch tělesa, je pohlcena. Přesně opačné vlastnosti vykazuje povrch bílého tělesa, které veškerou energii odráží. Opět je toto těleso jen teoretické. Reálné těleso je pak označováno jako šedé (spektrální těleso). Emisivita šedého tělesa je definována jako poměr radičních energií emitovaných z povrchu daného tělesa a tělesa černého při stejné teplotě. Hodnota emisivity bývá konstantní a nabývá hodnot z intervalu v rozmezí (0;1). (3) (5)

3.5.2 Měření teploty strojů pomocí termovizní kamery

Měření pomocí termovizní kamery je dnes velmi rozšířené, jelikož má velmi pozitivní vlastnosti. V oblasti diagnostiky elektrických strojů je termovizní kamera každodenní součástí měření. Velkou výhodou je vyloučení destruktivních účinků během přirozeného provozu daného stroje. Při aplikaci měření pomocí termovizní kamery jsou realizovány termogramy, z nichž je možné určit teplotu v každém místě měřeného povrchu. Pro lepší představu jsou na displeji termovizní kamery po každé kalibraci přiřazeny barvy k jednotlivým teplotám. Pomocí termovizního měření lze zjistit kompletní rozložení teploty na povrchu pláště motoru anebo lze diagnostikovat tření ložiska na základě zvýšení teploty štítů. Dále pak lze určit místo mezizávítového zkratu při aplikaci proudové zkoušky. (3)

Pro měření teploty jakéhokoliv povrchu je nejdůležitější emitovaná tepelná energie. Avšak svoji roli zde hrají další dvě energetické složky. Zejména pak energie odražená, kterou charakterizuje bezrozměrná veličina reflaktance. Pokud je tedy měřený povrch lesklý a v jeho blízkosti se nachází zdroj tepla, je měření podrobena značné chybě. Eliminace takové chyby je pak řešena pomocí zmatnění povrchu anebo pomocí aplikace křídového spreje, čímž se výrazně zredukuje negativní vliv reflaktance. Bohužel při zmatnění povrchu dochází ke změně jeho vlastností, což do měření vnáší opět chybu. Nejideálnějším řešením je použití křídového spreje, jehož výhody spočívají ve snadném odstranění křídového prášku z měřeného povrchu stroje a v minimálním ovlivnění vlastností povrchu během měření. (3) (6)

- **Výhody termovizní kamery**
 - nedestruktivní metoda
 - rychlost a jednoduchost měření
 - zamezení odstávek a demontáže stroje – úspora financí např. u generátoru
 - možnost měření rotujících a pohybujících se objektů
 - možnost měření velmi rychlých změn teplot
 - jednoduché měření na nedostupných místech
 - měření i velmi vysokých teplot
 - diagnostika stroje v jeho provozu
 - časová úspora při hledání poruchy

- následné digitální zpracování termogramů
- **Nevýhody termovizní kamery**
 - neznámá hodnota emisivity povrchu
 - nesprávná hodnota propustnosti prostředí
 - nepřesnost měření v důsledku vysokých hodnot reflaktance a transmitance

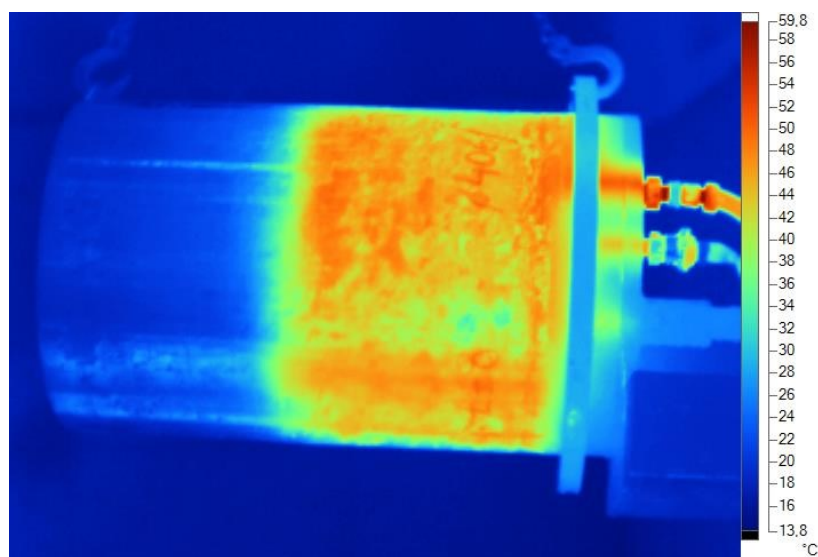
3.5.3 Příklady měření teplot

Ve společnosti HE jsem využíval termovizní kameru při každé funkční zkoušce stroje. V této části chci upozornit na tři situace, u kterých jsem byl přítomen a zároveň využil termovizní kameru k diagnostice poruchy motorů. Termovizní kamera FLUKE Ti50-0610023 velmi efektivně ušetřila čas a objasnila příčiny závad, které jsou uvedeny níže. Její přednost je v tom, že okamžitě generuje termogram s kompletní analýzou teplot, což je velmi pozitivní skutečnost při prezentaci poruchy v zákaznickově přítomnosti.

3.5.3.1 Porucha chlazení motoru

Jako první příklad zde uvádím motor, u kterého došlo k poškození chladicího systému. K nalezení místa poruchy mi velmi pomohla termovizní kamera, díky níž jsem toto místo lehce identifikoval. Pravděpodobně zde došlo k poškození, které je označováno jako tepelný zkrat. Chladicí systém je zde řešen pomocí spirály, která vede podél obvodu vnitřní části pláště motoru, přičemž vstup i výstup chladicího média (v tomto případě vody) se nachází na stejné straně. Chladicí potrubí vstupní vody a výstupní vody je tedy v blízkosti sebe.

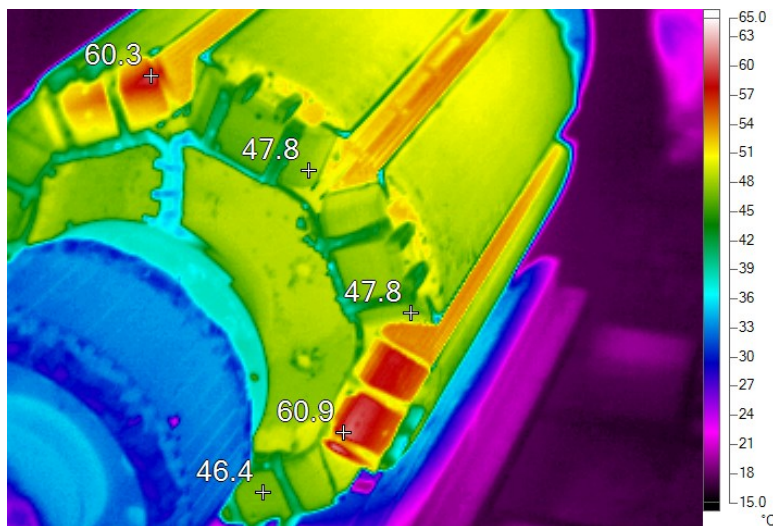
Při nesprávném chlazení znečištěnou vodou, kdy se vytváří usazeniny, na které se váží další nežádoucí částice, dochází k ucpání potrubí. V dolech se tyto situace většinou řeší nadměrným zvýšením tlaku tekoucí vody, což v tomto případě vedlo k proražení a spojení výstupního potrubí se vstupním. Oběh vody se pak uzavřel v poloviční úrovni délky motoru, což je zřetelné na obr. 3.30. K ověření poruchy bylo chlazení napojeno na zdroj teplé vody, díky níž byl na termovizní kameře zřetelnější průchod vody chladicím potrubím. Takový motor se těžko opravuje, a proto byl sešrotován.



Obr. 3.30 Porucha chlazení motoru

3.5.3.2 Závítový zkrat

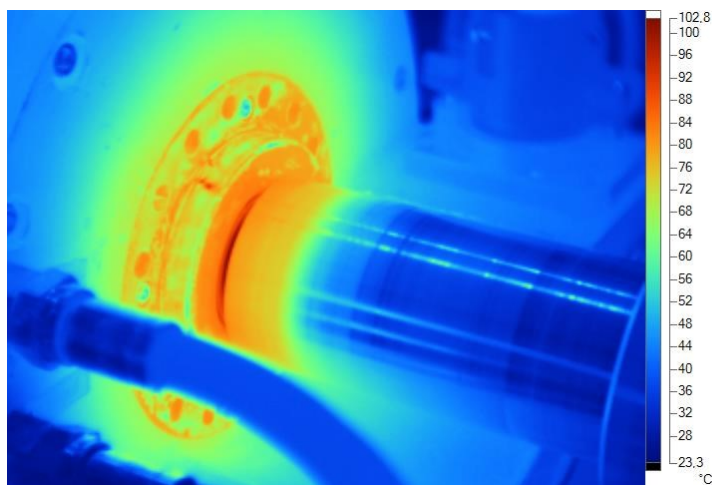
Druhým případem je měření teploty pro nalezení mezizávítového zkratu vinutí motoru. Podmínkou tohoto měření je aplikace proudové zkoušky. Vinutí je připojeno ke střídavému zdroji napětí s vysokou hodnotou frekvence, která způsobuje rychlou odezvu v podobě tepelného gradientu. Pokud se na vinutí vyskytuje porucha způsobená závítovým zkratem, bude viditelná na termogramu jako výrazně teplejší část od okolního vinutí. Při zachycení závítového zkratu v počátku proudové zkoušky je místo poruchy vidět na termogramu bodově. Po uplynutí delší doby se teplo přenáší vedením do ostatních závitů. Příklad takového závítového zkratu je vidět na obr. 3.31. (4)



Obr. 3.31 Porucha vinutí v podobě závítového zkratu

3.5.3.3 Teplota ložisek

Teplota ložisek se pomocí termovizní kamery změřit nedá, vzhledem k jejich vnitřnímu umístění. Avšak díky přenosu tepla vedením jsem schopen měřit teplotu na štítech motoru. Teplo se šíří skrze hřídel a guferový kroužek k plášti motoru. Toto měření bylo součástí každé zkoušky motorů naprázdno a nakrátko. Na základě změřené teploty se dá zjistit, jestli jsou ložiska správně usazená a nedochází k jejich nežádoucímu tření. Dalším důvodem zvýšení teploty je například výskyt ložiskových proudů nebo počínající porucha ložiska. Jedno z takových měření je vidět na obr. 3.32.



Obr. 3.32 Měření teploty štítů

3.5.4 Tepelné senzory

Tato část se věnuje dotykovému měření teploty. Konkrétně tepelným sensorům, které se nejčastěji vyskytovaly v motorech a se kterými jsem byl ve styku. Součástí každé diagnostiky motorů určených k revizi a opravě byla také zkouška měření odporu tepelných snímačů. Po dobu mé praxe jsem zaznamenal tři základní druhy teplotních sensorů (bimetalové, pt100 a PTC). Každý druh senzoru má charakteristické vlastnosti, účel a specifický princip snímání teploty, čemuž se podrobněji věnují jednotlivé popisy uvedené níže.

3.5.4.1 Tepelná spoušť

Smysl využití tepelné elektrické pojistky spočívá v dlouhodobé ochraně vinutí a izolace strojů před poškozením. Bimetalová pojistka je složena ze dvou kovových pásků, které mají odlišnou tepelnou roztažnost. Jakmile dojde k ohřevu, pásek s vyšší tepelnou roztažností se zakřivuje na stranu. Pokud dojde k překročení kritické meze teploty, stroj vypíná tepelná ochrana, která zamezí poškození a zapnutí stroje.

3.5.4.2 Kovové senzory

Jedná se o kovový odporový senzor, u kterého je využita závislost odporu na teplotě, kde se zvyšující se teplotou roste hodnota elektrického odporu. Tyto senzory tvoří kovy, jako jsou nikl, měď nebo platina. U niklu je velkou výhodou jeho citlivost, avšak jeho charakteristika odporu v závislosti na teplotě dosahuje značné nelinearity. Jeho vlastnosti jsou nestálé a je méně odolný vůči okolním vlivům prostředí. Co se týče mědi, tak se využívá jen zřídka. Je to hlavně z důvodu snadné oxidace a malého rozsahu měřených teplot. (7) (6) (5)

Nejrozšířenějším prvkem v kovových senzorech je platina. Její výhody spočívají především v její chemické stálosti, vysoké teplotě tání a velkém rozsahu měřených teplot od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Provedení takového senzoru je buď plošné, nebo vrstevné. U plošných sensorů je výhodou rychlá reakce, naproti tomu u drátových časová stálost. (5) (6)

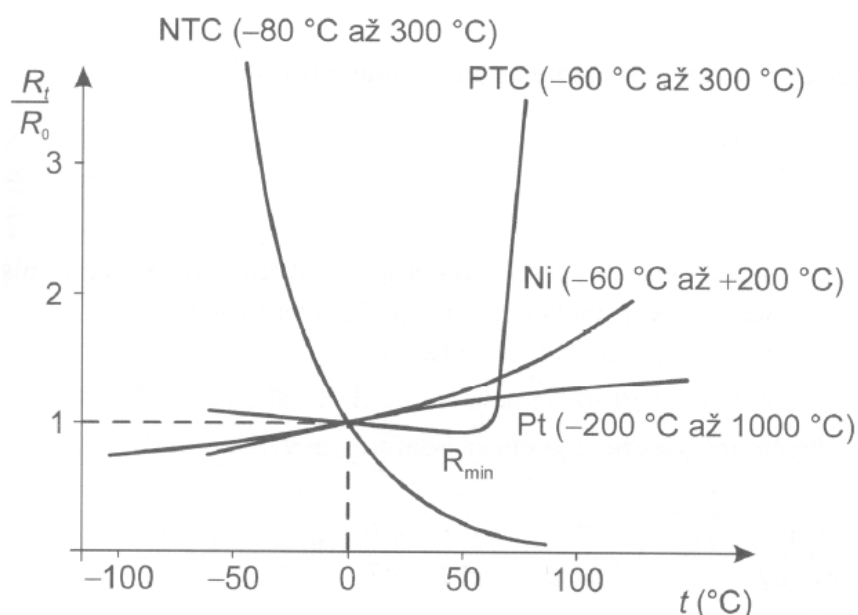
Měření odporu sensorů pt100 jsem aplikoval jak u motorů určených k opravě, tak u nových motorů. U strojů určených k opravě jsem musel vyhodnotit na základě vizuálního posouzení a naměřeného odporu, zda-li je třeba daný senzor vyměnit za nový. U nově vyrobených nebo opravených motorů jsem odpor sensorů pt100 měřil vždy před zahájením zkoušek a rovněž i po nich. Hodnota odporu za normálních okolních podmínek v klidovém stavu motoru odpovídala přibližně $100\text{ }\Omega$. Po měření motoru naprázdno a nakrátko se vždy hodnota odporu zvýšila právě z důvodu oteplení.

3.5.4.3 Polovodičové snímače

Rovněž u polovodičových odporových snímačů je využita závislost teploty na elektrickém odporu. Tyto snímače jsou vyrobeny z polovodičových feroelektrických materiálů. Jednou ze skupin polovodičových snímačů jsou termistory, které se dělí na negastory a pozistory. Tato část se bude

věnovat pouze pozistorům, jelikož jejich zastoupení v elektrických strojích je vůči negastorům majoritní.

PTC termistor (Positive Temperature Coefficient) je charakteristický pro kladný teplotní součinitel odporu. Jeho velkou výhodou je vysoká citlivost, velmi malé rozměry v řádech jednotek mm a možnost měření odporu na delší vzdálenosti. Nevýhoda pak spočívá v nelinearitě, která je vidět na obr. 3.33, kde je rovněž srovnání charakteristik kovových a polovodičových snímačů. Pro měření teploty je senzor PTC nevhodný právě z důvodu této nelinearity. Proto je využíván jako součást tepelných ochran, jejichž úkolem je zareagovat při nesprávném zatěžování motoru. Odpor pozistoru se zvyšující se teplotou zpočátku mírně klesá, a poté začne prudce stoupat. (5) (6)



Obr. 3.33 Srovnání linearity kovových a polovodičových senzorů

3.6 Vibrodiagnostika

Jedním z hlavních pilířů diagnostiky je vibrodiagnostika. Její podstatou je měření a vyhodnocení škodlivého kmitání rotujících částí strojů. Na základě této metodiky měření je možné prodlužovat životnost stroje v důsledku plánování řízení jeho údržby. Taktéž lze přesně diagnostikovat místo a druh poruchy elektrického stroje.

Jako vibrace je označeno mechanické kmitání, které vzniká na základě působení nežádoucích sil. Tyto síly mají celou řadu příčin. Jsou rozdělovány do dvou základních skupin. Jsou to příčiny elektromagnetické a mechanické. Oba druhy jsou vypsány níže. (3) (1)

- **Elektromagnetické příčiny:**
 - ložiskové proudy
 - přesycení
 - přerušení rotorové tyče
 - negativní vliv drážkování rotoru a statoru
 - nesymetrie magnetického obvodu

- **Mechanické příčiny:**
 - statická a dynamická nevyváženost rotující části
 - nesouosost
 - chybné uložení ložisek
 - volba nekvalitního ložiska s výrobní vadou
 - ohnutá hřídel
 - poruchy ozubených a řemenových převodů
 - aerodynamické síly

3.6.1 Měření a vyhodnocení vibrací

Pro vyhodnocení vibrací je použita efektivní rychlost kmitání anebo zrychlení v podobě násobku gravitačního zrychlení g . Záleží na druhu diagnostikované poruchy z důvodu určení frekvence snímání. Úrovně vibrací čtyř základních typů elektrických strojů jsou uvedeny v tab. 3.10.

Tab. 3.10 Přípustné hodnoty vibrací

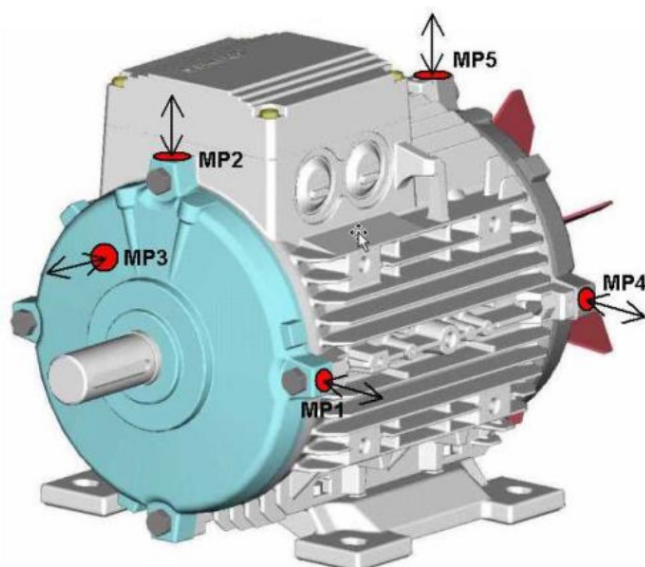
28				
18				
11		NEPŘÍPUSTNÝ		
7				
4,5				
2,8		NEUSPOKOJIVÝ		
1,8				
1,1		USPOKOJIVÝ		
0,7				
0,45		DOBRÝ		
0,28				
V_{eff}	skupina K	skupina M	skupina G	skupina T
	malé stroje s výkonem do 15kW	17-75kW nebo až 300kW na speciálním základě	více než 75kW velké stroje na pevném a mohutném základu	Turbosoustrojí

Ve společnosti HE jsem využíval k měření vibrací měřicí přístroj Adash 4000VA3. Tento přístroj má mnoho funkcí a je schopen měřit jak ve statickém, tak v dynamickém režimu. Je vybaven piezoelektrickým akcelerometrem s ICP napájením. Snímání zrychlení funguje na principu piezoelektrického jevu. Snímač je vybaven krystalem, který je deformován. V důsledku deformace dochází k přesunu náboje a vzniku elektrického napětí. Dochází tedy k přeměně neelektrické veličiny na elektrickou. Akcelerometr je doplněn o další integrované obvody, které přeměňují vysokoimpedanční signál na nízkoimpedanční. Pro přepočítání zrychlení na rychlost kmitání se zde rovněž nachází integrální člen. (8)

Již zde bylo zmíněno měření dynamických a statických dat. Dynamická data jsou například tvořena spektrální frekvenční analýzou, ve které je zobrazena měřená veličina (zrychlení, rychlost kmitání) v závislosti na frekvenci. Podle hodnot frekvence se dá zjistit, které přísluší vrozeným a poruchovým stavům. Využití měření dynamických dat spočívá v diagnostice konkrétní poruchy. Tomuto měření většinou předchází měření statických dat. Jsou reprezentovány jednou hodnotou (RMS, PEAK). Příkladem je měření širokopásmových hodnot vibrací nebo měření otáček. Nadměrná hodnota zrychlení nebo rychlosti kmitání pak upozorňuje na závadu, která se musí řešit. (9)

Před měřením statických hodnot je zapotřebí definovat frekvenční rozsah a měřenou veličinu. Při vykonávání mé praxe jsem měřil rychlost vibrací v rozsahu kmitočtu do 1000 Hz. Z oblasti nízkých kmitočtů lze tedy naměřit hodnoty vibrací týkající se nevyváženosti, ohybu a nesouososti hřídele. (9) (10)

Poté přichází měření zrychlení mechanického kmitání v oblasti vysokého kmitočtu. Zrychlení je zde znázorněno násobkem gravitačního zrychlení. V této kmitočtové oblasti se nejvíce projeví poruchy ložisek. Dochází k mechanickým rázům, které by se v rámci měření při nižším kmitočtu nedaly zjistit. Nutno poznamenat, že obě měření probíhají na měřících bodech v axiálním, horizontálním a vertikálním směru (obr. 3.34). (8)



Obr. 3.34 Měřicí body elektromotoru (8)

3.6.2 Příklad měření vibrací

Pro příklad zde uvádím výsledky měření vibrací asynchronního motoru v tab. 3.11.

Tab. 3.11 Výsledky měření vibrací

Měřeno při zkoušce naprázdno		pohon	přední strana
ISO [mm/s, RMS, 1 - 1000Hz]	axiál x	0,61 mm/s	0,73 mm/s
	horizontál y	1,01 mm/s	1,42 mm/s
	vertikál z	0,74 mm/s	0,59 mm/s
HFV [g, RMS, 5 - 16kHz]	axiál x	0,191 g	0,022 g
	horizontál y	0,044 g	0,039 g
	vertikál z	0,057 g	0,023 g

Měřený motor spadá do kategorie M. Na základě naměřených hodnot v referenčních měřících bodech lze usoudit, že je jeho stav dobrý a oprava se podařila. Motor byl tedy nalakován, byl mu přidělen nový štítek, a poté exportován zpět k zákazníkovi.

4 Znalosti a dovednosti získané v průběhu studia uplatněné studentem v průběhu praxe

Během výkonu praktické části bakalářské práce jsem uplatňoval znalosti získané během studia. Především mi dopomohly předměty, jako jsou Elektrické stroje I, Elektrické stroje II. Znalosti z těchto předmětů tvořily základy, o které jsem se opíral při řešení nečekaných a neznámých situací. Konkrétně pochopení souvislostí, analogií a rozdílů mezi jednotlivými druhy elektrických strojů. Rovněž mi pomáhala znalost základních vzorců pro výpočet výkonů, otáček anebo momentu síly, které byly při zkouškách strojů nezbytné. Mimo předměty, které se přímo zaměřovaly na problematiku elektrických strojů, mi velmi pomohl předmět Fyzika II. Pod vedením Ondřeje Životského jsem pochopil základní zákonitosti elektromagnetického pole. Při vykonávání praxe jsem si jednotlivé souvislosti začal lépe uvědomovat. Klíčovým předmětem, který mě skutečně připravil, byla Diagnostika elektrických zařízení. Všechny diagnostické metody, které jsem používal a o kterých se zmiňuji v této práci, jsem znal právě díky tohoto předmětu.

5 Znalosti či dovednosti scházející studentovi v průběhu odborné praxe

Znalosti, které mi chyběly v průběhu vykonávání práce, byly zejména praktického charakteru. Především co se týče konstrukčního hlediska elektrických strojů. Jelikož jsem byl už v období letních prázdnin zaměstnán na pozici montážníka, rozebíral jsem a zase skládal elektrické motory a generátory. Při této práci jsem viděl technologický postup opravy a taktéž všechny náležité díly elektromotoru. Řešením by mohlo být vymezení části laboratorního cvičení k popisu konkrétních dílů včetně jejich funkce. Dalším posílením výuky by také mohly být exkurze nebo větší zastoupení laboratorních cvičení v průběhu semestru.

6 Dosažené výsledky v průběhu odborné praxe a její celkové zhodnocení

Celkově musím absolvování praxe ve společnosti HE zhodnotit velice kladně. Prvním z důvodů byla práce pod zkušenými technikami, konkrétně pod Pavlem Dudou a Mariánem Uhrem. Při řešení problémů probíhala s oběma kvalitní a jednoznačná domluva. Rovněž musím velmi kladně ohodnotit ochotu při konzultování méjí bakalářské práce.

Praxe ve společnosti HE mi propojila teoretické znalosti s těmi praktickými. Zejména připomenutí a rozvinutí vědomostí z laboratorních cvičení předmětů Elektrické stroje a Diagnostika elektrických zařízení. Naučil jsem se měřit a vyhodnocovat izolační odpor, polarizační indexy nebo test vybíjení dielektrika. Dále jsem byl schopen použít zkoušku rázovou vlnou, která ve většině případů rozhodla, jestli bude motor podroben střední nebo generální opravě. Pochopil jsem rozdíly struktury a funkčnosti tepelných senzorů. Měl jsem možnost vidět nejrozumnější druhy elektrických strojů od malých nízkonapěťových strojů, přes hydroalternátory, až po vysokonapěťové motory s velkými hodnotami výkonů. Rozvinul jsem si vědomosti v oblasti zařízení určených do prostředí s možností výbuchu, která mají speciální nároky na konstrukci a tudíž i na jejich samotnou opravu. Nedílnou součástí zkoušek bylo měření a vyhodnocování vibrací. Díky praxe jsem si uvědomil velikost naměřených statických dat. Pokud byly naměřené hodnoty nadměrné, konzultoval jsem s technikami jejich příčinu a snažili jsme se najít řešení k jejímu odstranění nebo eliminaci. Dalším poznatkem bylo vizuální posouzení a odhad příčiny poruchy, což si vyžaduje delší časové období. Samostatně jsem měřil teplotu štítů a vyhodnocoval termogramy. Ke konci praxe jsem byl plně schopný provést diagnostické zkoušky, které jsou v této bakalářské práci popsány v plném rozsahu.

Jelikož se zkoušky opakovaly, měl jsem možnost si uvědomit souvislosti, které bych při jednorázové aplikaci metody nepochopil. Protože jsem v průběhu vykonávání praxe psal tuto práci, musel jsem některé znalosti doplňovat samostudiem. O to větší nadšení jsem zažíval při pochopení mnou nastudovaných vědomostí v průběhu měření a testování elektrických strojů. Další nespornou výhodou bylo propojení poznatků elektrotechnického oboru se strojním, díky němuž mám komplexnější pohled na danou problematiku.

Citovaná literatura

1. **Chmelík , Zdeněk, Mišák, Stanislav a Sokanský, Karel.** *Technická diagnostika na elektrických zařízeních.* [Dokument] Ostrava : autor neznámý.
 2. **Pavlík, Josef.** *Vybrané problémy z diagnostiky izolačních systémů točivých elektrických strojů.* [Disertační práce] Brno : autor neznámý, 2011.
 3. **Mišák, Stanislav.** *Technická diagnostika.* [Skriptum] Ostrava : autor neznámý, 2007.
 4. **Lábadi, Jiří.** *Kontrola mezizávitové izolace rotoru za provozu stroje.* [Bakalářská práce] Plzeň : autor neznámý, 2014.
 5. **Král, Vladimír.** *Elektrické světlo a teplo část 2, Elektrotepelná technika.* [Učební text] Ostrava : autor neznámý, 2005.
 6. **Halfar, Ivo.** *Měření teploty v elektrických strojích.* [Bakalářská práce] Brno : autor neznámý, 2010.
 7. **Konečný, Jiří.** *Laboratorní teploměr s čidlem PT100.* [Bakalářská práce] Brno : autor neznámý, 2011.
 8. **Hlaváček, Tomáš.** *Diagnostika vibrací elektrických strojů.* [Diplomová práce] Brno : autor neznámý, 2015.
 9. **Neznámý.** *Analyzátor vibrací.* [Uživatelský manuál] Ostrava : autor neznámý.
 10. **Pavec, Martin.** *Jednostranný magnetický tah a excentricita v elektrických strojích.* [Bakalářská práce] Plzeň : autor neznámý, 2014.
-